

***Р. Р. Хайруллин^{1*}, И. А. Евдокимов^{1,2}, С. А. Перфилов¹,
А. А. Поздняков¹, В. Д. Бланк¹***

¹ФГБНУ «Технологический институт сверхтвёрдых и новых углеродных материалов»,
г. Москва, г. Троицк

²Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение
СИКОМП», г. Владимир

*radionowi4@bk.ru

НАНОСТРУКТУРНЫЕ АЛЮМОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМИ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В рамках данной работы получены и исследованы наноструктурные алюмоматричные композиционные материалы со значением предела прочности при изгибе до 1100 МПа, микротвердости до 3300 МПа и удельной прочности до 34 км. Проведены исследования влияния дополнительного легирования магнием и модифицирования фуллереном C₆₀ на структурно-фазовый состав и физико-механические свойства алюмоматричных композиционных материалов.

Ключевые слова: алюмоматричные композиционные материалы, удельная прочность, фуллерен C₆₀.

***R. R. Khayrullin, I. A. Evdokimov, S. A. Perfilov, A. A. Pozdnyakov,
V. D. Blank***

NANOSTRUCTURED ALUMINUM COMPOSITE MATERIALS WITH HIGH STRENGTH CHARACTERISTICS

In this work nanostructured aluminum-matrix composite materials with bending strength up to 1100 MPa, microhardness up to 3300 MPa and specific strengt up to 34 km were obtain and investigated. The effect of additional magnesium doping and modifying by fullerene C₆₀ on the structure, phase composition and mechanical properties of the resulting composites were study.

Keywords: composites, fullerene C₆₀, aluminum-magnesium alloy, nanostructuring.

Создание новых материалов конструкционного и функционального назначения является одной из приоритетных задач современного материаловедения. Традиционные металлы и сплавы в значительной мере достигли предела своих механических и технологических свойств, что ограничивает их применение в современной науке и технике. Создание новых материалов требует применения инновационных методов и

технологий. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных путей повышения прочностных свойств композиционных материалов (КМ) является наноструктурирование материала матрицы, в совокупности с дополнительным легированием КМ наноразмерными высокомодульными и химически активными частицами (оксидов, нитридов, карбидов, углеродных наноструктур (УНС) и т. д.).

Наноструктурные металломатричные композиционные материалы (НКМ) могут превосходить традиционные металлы и сплавы по целому ряду свойств и характеристик.

В рамках данной работы, методами порошковой металлургии были получены алюмоматричные НКМ, проведены исследования влияния дополнительного легирования магнием и модифицирования фуллереном C_{60} на структурно-фазовый состав и физико-механические свойства объемных образцов НКМ.

В качестве исходных материалов для получения НКМ применяли алюминий-магниевый сплав АМг6 (ГОСТ 4784–97), для увеличения концентрации магния, в состав КМ дополнительно вводилось 3–12 вес.% магния (99,9 %), в качестве модифицирующей добавки в состав КМ дополнительно вводилось 0,3 вес. % фуллерена C_{60} (99,5 %). Механоактивационную обработку (МА) исходных материалов проводили в планетарной шаровой мельнице АГО-2У. Для предотвращения окисления и протекания других не желательных реакций все манипуляции с исходными материалами и полученными порошками проводились в заполненном аргоном, изолирующем перчаточном боксе поддерживающим чистоту атмосферы по кислороду и парам воды не хуже 0,1 ppm. По данным рентгеноструктурного анализа (РСА) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) средний размер кристаллитов алюминия после обработки составил 20–25 нм. Полученные после размолва порошки компактировались в цилиндрические брикеты под давлением 0,5–0,6 ГПа. Полученные брикеты подвергали прямой горячей экструзии при температуре 270 °С и степени деформации 6,25. Экструдированные образцы механически обрабатывались для дальнейших исследований и испытаний.

Для диапазона концентраций магния от 3 до 18 вес. % исследована кинетика изменения среднего размера кристаллитов в процессе совместной механоактивации исходных материалов в планетарной шаровой мельнице (рис.1).

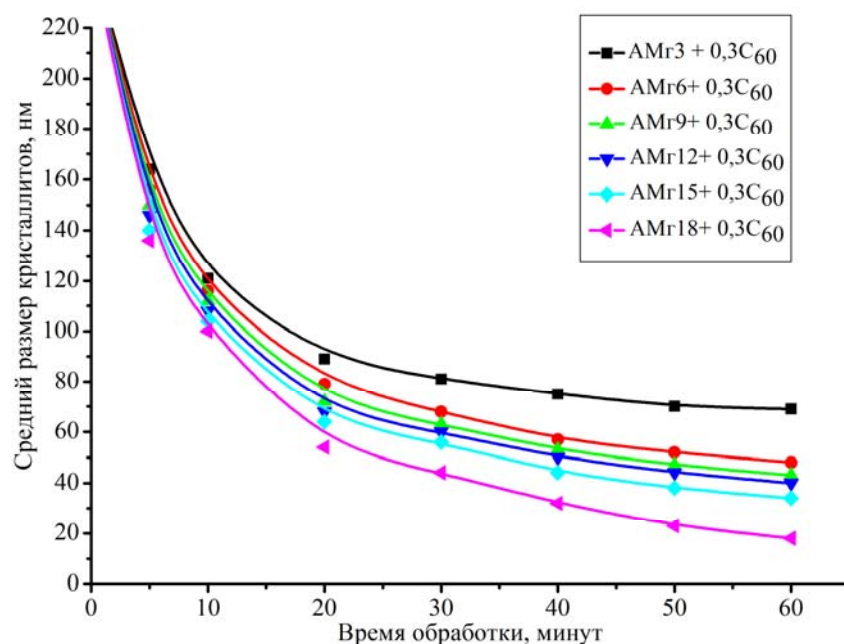


Рис. 1. Исследование зависимости среднего размера кристаллитов НКМ от концентрации магния (частота вращения валика 1800 об./мин.)

Методом РСА и ПЭМ было установлено, что в процессе размола магний образует насыщенный твёрдый раствор, о чем свидетельствует увеличение параметра решётки алюминия. В результате пересыщения границ алюминиевых зерен магнием, увеличивается вклад твердорастворного упрочнения в общую прочность НКМ. Согласно ПЭМ и РСА избыточный магний, не участвующий в образовании твёрдого раствора, образует ультрадисперсную интерметаллидную фазу Al_3Mg_2 и $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ (рис. 2).

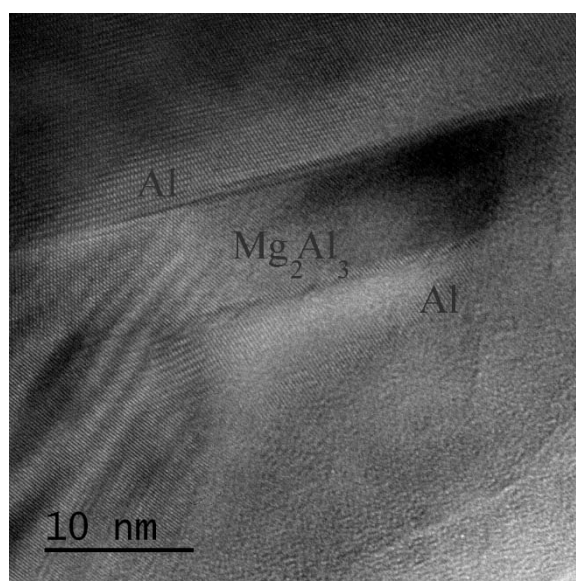


Рис. 2. ПЭМ изображение интерметаллидной фазы в НКМ после МА

Для установления допустимых интервалов консолидации механоактивированных порошковых смесей был проведен ряд экспериментов, направленных на исследование термической стабильности полученных образцов НКМ. ниже, на рис. 3 представлены результаты исследования термической стабильности методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). На представленных графиках видно, что в интервале температур 290–310 °С в материалах наблюдается начало протекания необратимых превращений, сопровождающихся эндотермическими и экзотермическими эффектами.

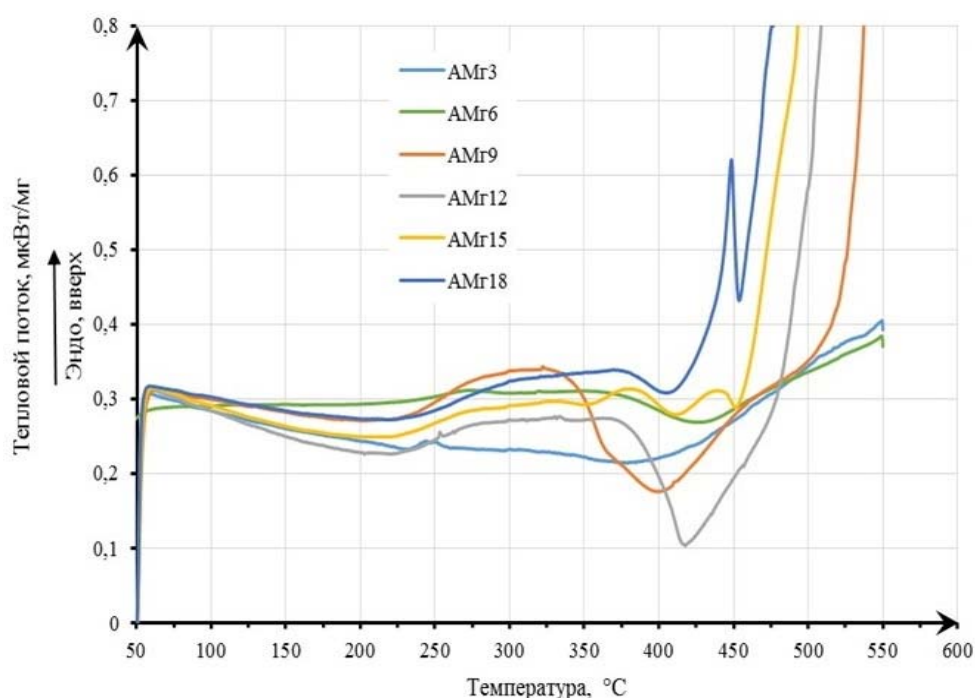


Рис. 3. Исследование термической стабильности НКМ методом ДСК (скорость нагрева 40 К/мин, концентрация фуллерена C_{60} = 0,3 вес. %)

Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и РСА было установлено, что наблюдаемые тепловые эффекты связаны с рекристаллизацией матричного сплава, разрушением алюминий-фуллереновых комплексов и образованием карбида алюминия Al_4C_3 (рис. 4). Образование карбида алюминия является нежелательным, поскольку его наличие может снизить физико-механические и эксплуатационные свойства полученного материала.

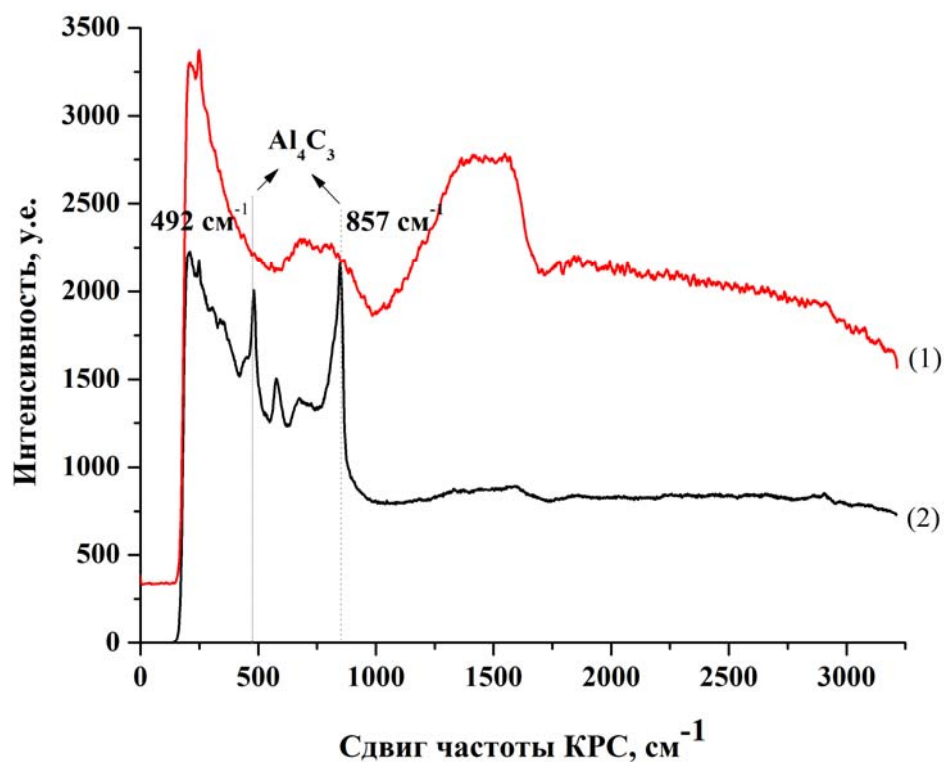


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния света НКМ после отжига: 1 – при 290 °С, 2 – при 400 °С

Длительные отжиги (до пяти суток) при температуре 200–250 °С не оказывали влияния на конечные физико-механические свойства и структурно-фазовый состав полученных образцов НКМ. Модифицирование НКМ фуллереном C_{60} позволяет стабилизировать полученную наноструктуру и предотвратить рекристаллизацию матричного сплава до 270°С.

Экструдированные образцы НКМ демонстрируют повышенные значения механических свойств, при сохранении плотности на уровне 2,65–2,49 г/см³. Предел прочности при растяжении до 880 МПа, предел прочности при изгибе до 1100 МПа и микротвердость до 3300 МПа. Максимальное значение удельной прочности полученных НКМ составило 34 км (для НКМ типа АМг9 + 0,3 вес. % C_{60}), что сопоставимо со свойствами некоторых угле- и стеклопластиков и некоторых титановых сплавов. Применение таких материалов перспективно в областях науки и техники где соотношение прочности изделия к его весу имеет ключевое значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках соглашения № 14.574.21.0162 от 26 сентября 2017 г., идентификационный номер проекта RFMEFI57417X0162.